

Semiconductores. La unión P-N

Melvin
Bogetof

conductores
aislantes

→ semiconductores
Si - es el segundo elemento más abundante en la naturaleza
Ge - es el tercer elemento más abundante
AsGa - compuesto

En semiconductores dopados:

→ e⁻ → P
→ e⁻ → N

Tensión umbral

Si → 0.7V
Ge → 0.3V
AsGa → 1.2V

4 electrones en la órbita exterior.

Diodo

Es un dispositivo NO LINEAL. (Modelo real)

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{n V_T}} - 1 \right)$$

Corriente inversa de saturación. Depende de la T[°]
Tensión aplicada al diodo
n ∈ [0, 2]
V_T = diodo ideal n=1
$$V_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

Tensión térmica

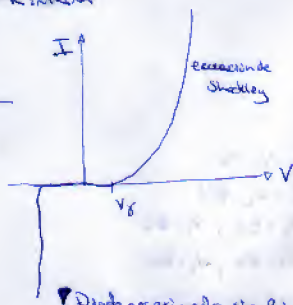
Ecuación de Shockley

1N4001
1N4007

Admite linealizaciones (modelos aproximados):

- Diodo ideal *
- Diodo aproximado sin R interna **
- Diodo aproximado con R interna

* Si no especifica lo anterior, utilizaremos este modelo en general.
** Si nos dice el nombre del elemento (generio, silicio...) no es ideal. Nos dice cómo para, usamos el modelo con o sin R interna.



! Diodo ideal

P.D. → cortocircuito



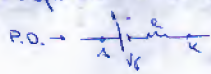
P.I. → circuito abierto



! Diodo aproximado sin R interna



! Diodo aproximado con R interna



Métodos para resolver circuitos con diodos:

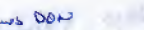
- Reducción al absurdo
- Métodos numéricos
- Punto crítico del diodo

2001/01/28 - 2001/01/28



$$V_g = 5V$$

$$I_b \approx 0 \rightarrow 0N \rightarrow 0k\Omega$$

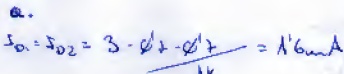
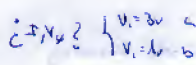


$$I_D = 4.3 \text{ mA}$$

c) S^2 ; $R_1 = 10 \Omega$; Suponemos DON



$$I_D = \frac{413}{1014} \text{ mA} \quad V_D = \frac{413}{1014}$$



$$V_{\phi} = 1.6 \text{ V}$$



$$2\sigma_1 = 3\sigma_2 = 3 \cdot \frac{\phi_1' - \phi_2'}{4\epsilon} = -\phi_1' \approx 1$$

$$- \varphi' y_{m+1} < 0 \rightarrow \text{MSL}$$

$$V_{\phi} = \phi v$$



$$\left. \begin{array}{l} I_{D1} \\ I_{D2} \\ V_R \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{a. } V_1 = V_2 = 5V \\ \text{b. } V_1 = V_2 = 0V \\ \text{c. } V_1 = 5V ; V_2 = 0V \\ \text{d. } V_1 = 0V ; V_2 = 5V \end{array}$$

उपेक्ष

Q. $I_{01} = I_{02} = \frac{5}{1k} \cdot \frac{1}{2} = 2.5 \text{ mA}$

$$V_{\phi} = 2.5 \text{ V}$$

b. $f_{01} = f_{02} = \emptyset \forall$

$$V_g = QV$$

c. $I_{D1} = \frac{2}{M} = 5 \text{ mA}$ $V_p = 5 \text{ V}$

$$I_{O2} = 4A$$

2. $I_{p1} = 10A$ $V_{ce} = 5V$ $I_{p2} = 5mA$

Approximate SIN

$$Q. I_{D1} = I_{D2} = \frac{5 - 0.7}{1k} \cdot \frac{1}{2} = 2.15 \text{ mA}$$

$$r_{\varphi} = 4'3''$$

b. $I_{D1} = I_{D2} = 0V$ $V_{gs} = 0V$

c. $I_{D2} = 4 \text{ A}$ $I_{D1} = \frac{5 - 0.7}{1k} = 4.3 \text{ mA}$ $V_{D1} = 4.3 \text{ V}$

∴ $I_{D1} = 0A$ $I_{D2} = 413\mu A$ $V_o = 4.3V$

Clases de diodos



Capacidad de difusión
Capacidad de depleción

= Diodos Schottky (prácticamente no tienen región de depleción, reduciendo así las capacidades parásitas y haciéndolos adecuados para altas frecuencias)



- Diodos de potencia (región de depleción más ancha)

En conducción soportan tensiones muy bajas y corrientes muy altas.

En polarización inversa, soportan tensiones inversas muy altas y corrientes muy bajas.

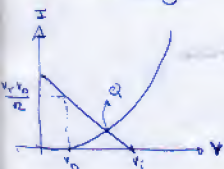
- Varicaps (diodo que trabaja como un condensador variable controlado por tensión)

- Fotodiodos (diodo cuyo corriente es una función de la luz incidente)

- Diodos emisores de luz (LEDs)

- Diodos Zener

Recta de carga



Don

$$V_0 = V_D$$

$$I_0 = \frac{V_1 - V_0}{R}$$

$$(x_1, y_1)$$

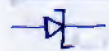
Doit

$$I_0 = I_A$$

$$V_0 = V_D = V_1$$

$$(x_2, y_2)$$

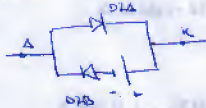
Diodo Zener



Polarización directa: rectificador

Modelo equivalente

Polarización inversa: $|V_1| < |V_Z| \rightarrow \text{OFF}$
 $|V_1| \geq |V_Z| \rightarrow V_Z$

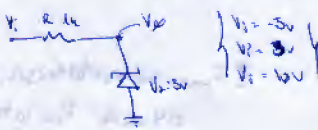


Utilidades:

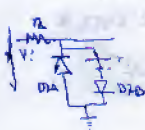
- Referencia de tensión constante.
- Elemento regulación.



Ej.



$$\begin{cases} V_1 = -5V \\ V_Z = 5V \\ V_2 = 5V \end{cases}$$



Suponemos $I_{ZB} = 0V$

$$-5 = 1k \cdot I_{ZB} + 5 \quad I_{ZB} = -10mA$$

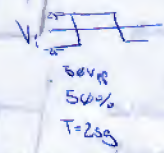
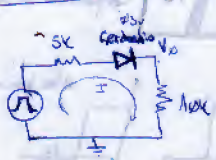
Supongo $I_{ZB} = 0V$

$$0 = I_{ZB} \cdot 1k - 5 \quad I_{ZB} = 5mA$$

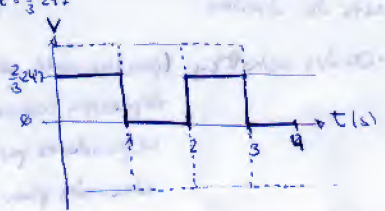
$V_{ZB} = 5V$

TE-II-004

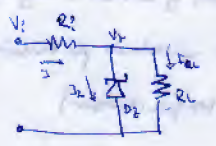
Ejercicio propuesto



Dibujar forma de onda 2 ciclos



Regulador Zener



$$I = \frac{V_1 - V_Z}{R_1} = I_Z + I_{LZ}$$

$V_1 \begin{cases} \text{máx} \\ \text{mín} \end{cases}$
 $I_Z \begin{cases} \text{máx} \\ \text{mín} \end{cases}$
 $I_L \begin{cases} \text{máx} \\ \text{mín} \end{cases}$

$R_1 (S2)$
 $P_o (R_1)$
 $P_o (Zener)$

worst-case
 $V_{1\text{máx}}$
 $I_{Z\text{máx}}$
 $I_{L\text{máx}}$
 $V_1 \text{ mínima}$
 $I_Z \text{ mínima}$
 $I_L \text{ mínima}$

$I_{Z\text{máx}} = 10 I_{Z\text{máx}}$
 $I_{Z\text{máx}} = 10 I_{Z\text{máx}}$

Ⓐ

$$I = \frac{V_{1\text{máx}} - V_Z}{R_1} = I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{máx}}$$

$$R_1 = \frac{V_{1\text{máx}} - V_Z}{I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{máx}}}$$

Ⓑ

$$I = \frac{V_{1\text{máx}} - V_Z}{R_1} = I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{máx}}$$

$$R_1 = \frac{V_{1\text{máx}} - V_Z}{I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{máx}}}$$

Ej:

Ejemplo 36 (Sawatz et Al)

$$V_Z = 10V$$

$$V_1 = 14-20V$$

$$I_{LZ} = 20-200mA$$

$$\frac{14-10V}{200mA + I_{Z\text{máx}}} = \frac{20V-10V}{20mA + I_{Z\text{máx}}}$$

$$0.08 + 40 I_{Z\text{máx}} + 2 + 10 I_{Z\text{máx}} = 30 I_{Z\text{máx}} = 2 \cdot 0.08$$



$$I_{Z\text{máx}} = \frac{14-10V}{30} = 64mA$$

$$I_{Z\text{máx}} = 10 I_{Z\text{máx}} = 0.533A$$

$$R_1 = 15.8 \Omega$$

$$P(R_1) = 1.2W$$

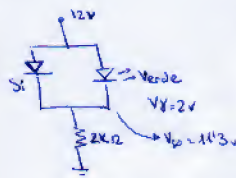
$$I = I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{máx}} = 0.533 + 0.08 = 0.613A \rightarrow P = (0.533)^2 \cdot 15.8 = 6.3W$$

$$I = I_{Z\text{máx}} + I_{L\text{máx}} = 0.533 + 0.08 = 0.613A$$

$$P(I) = I_{Z\text{máx}} \cdot V_Z = 0.533 \cdot 10 = 5.33W$$

$I_{Z\text{máx}}$ no es 0.533A, es 64mA. Por lo tanto,
 $I_{Z\text{máx}} = 64mA$

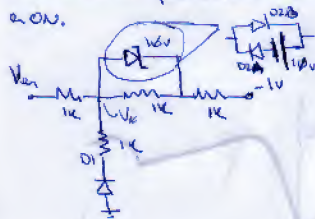
2.12 Boylestad



El diodo de silicio enciende antes a conducir y polariza al LED en inversa.

Punto crítico

El diodo está ON para la corriente que lo atraviesa es ≈ 0 . Es justo el punto de transición de ON a OFF o de OFF a ON.

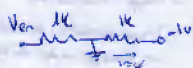


- 1) Suponer el diodo en punto crítico
- 2) Determinar el estado de cada diodo restante
- 3) Calcular el punto crítico
- 4) Determinar las regiones y espacio de estados
- 5) Construir la tabla de transiciones/estados
- 6) Resolver el circuito

Punto crítico D1

D1 ON ; $I_{D1} \approx 0$

D2A OFF D2B ON

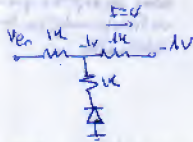


$$V_{x1} = \frac{1}{1k} \cdot 10V = 1V$$

Punto crítico D2B

D2B ON ; $I_{D2B} \approx 0$

D2A OFF



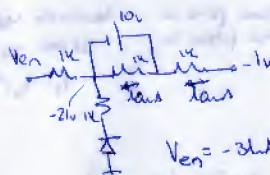
$$V_{x1} = -1 \cdot \frac{1}{1k} \cdot 10V = -2V$$

Punto crítico D2A

D2A ON ; $I_{D2A} \approx 0$

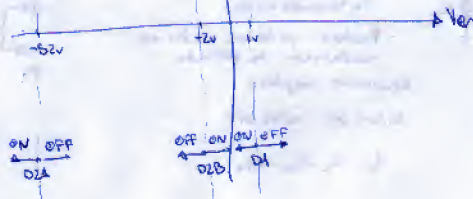
D2B OFF D1 ON

$$V_{x1} = \frac{10}{1k} \cdot 2k - 1V = -21V$$



$$V_{x1} = -3 \cdot 1k \cdot 10 - 21 = -52V$$

③ ⑥ ④ ②



$$a) V_{x1} = \frac{V_{x1} - 11}{3}$$

$$b) V_{x1} = 0.4 V_{x1} - 0.2$$

$$c) V_{x1} = 0.33 V_{x1} - 0.33$$

$$d) V_{x1} = \frac{V_{x1} - 1}{2}$$

ON OFF
D2A

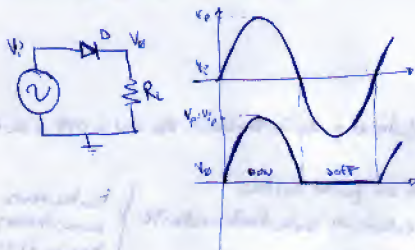
OFF ON ON OFF
D2B D1

Circuitos con diodos

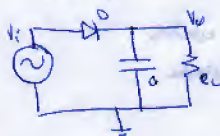
Hambley
Boylestad

Rectificadores: C/A \rightarrow C/C

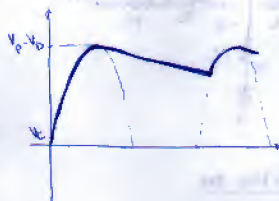
Rectificador de media onda



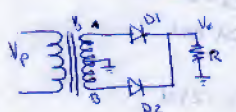
- Poco eficiente
- Para ser unipolar, no es en absoluto continua



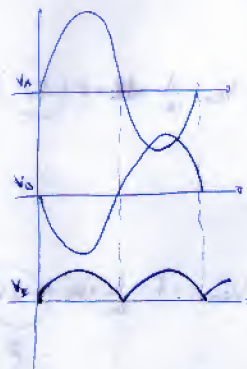
- En los ciclos positivos, V_C se carga
- $V_C = V_p - V_D$
- $T \gg \tau$, para que el condensador no tenga tiempo para descargarse



Rectificador de doble onda



- Semiciclo positivo:
 $D1$ ON $D2$ OFF
 $V_0 = V_A - V_D$
- Semiciclo negativo:
 $D1$ OFF $D2$ ON
 $V_0 = V_B - V_D$



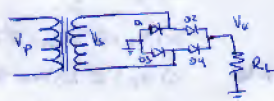
- Mejor rendimiento
- Inconveniente: necesitamos un transformador de tensión intermedia (caro)

$$V_S = \frac{V_{AB}}{2}$$

Para conseguir la misma tensión, necesitamos el doble de espiras que con un transformador sin toma intermedia

Puente de diodos (Graetz)

- No necesitamos transformador de toma intermedia.



- Semiciclo positivo:

$D2/D3$ ON $D1/D4$ OFF

$$V_0 = V_S - V_{D2} - V_{D3}$$

- Semiciclo negativo

$D1/D4$ ON $D2/D3$ OFF

$$V_0 = V_S - V_{D1} - V_{D4}$$

- Inconveniente: en lugar de tener una caída de tensión en un diodo, la tenemos en dos.

- También podemos añadir un condensador de filtrado

- Podemos añadir un regulador zener para estabilizar la salida.



Cálculo de la capacidad del condensador para rectificadores de doble onda.

$$C = \frac{I_L \cdot T}{2 V_R} \quad (\text{resultado en Faradios})$$

Ejercicio

Hantley 3.5

- $I_L = 0.1 \text{ A}$
- $V_{CC} = 15 \text{ V}$
- $V_S = 10 \text{ V}_{\text{rms}}$
- $f = 60 \text{ Hz}$
- $V_R = 0.4 \text{ V}$
- Diodos de silicio

¿Número de espiras en el secundario?

$$C = \frac{100 \text{ mA} \cdot 0.016 \text{ s}}{2 \cdot 0.4 \text{ V}} = 2.083 \text{ mF}$$

Circuitos recortadores (limitadores)

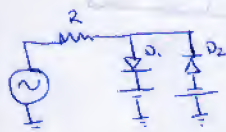
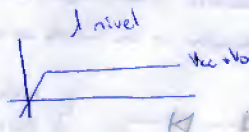


$$\text{Si } V_i > V_{CC} + V_0$$

Don
 $V_0 = V_{CC}$

$$\text{Si } V_i \leq V_{CC} + V_0$$

Don
 $V_0 = V_i$



$$\text{Si } V_i \geq V_{CC} + V_{01}$$

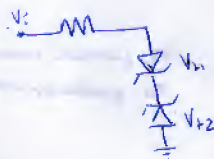
D_1 on
 D_2 off

$$V_0 = V_{CC} + V_{01}$$

$$\text{Si } V_i \leq V_{CC} + V_{02}$$

D_2 on
 D_1 off

$$V_0 = -V_{02} + V_{CC}$$



$$\text{Si } V_i \geq V_{01} + V_{02}$$

D_{01} D_{02} ON

$$V_0 = V_{01} + V_{02}$$

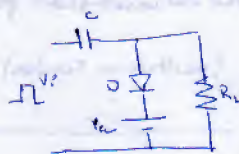
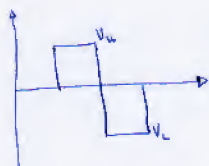
$$\text{Si } V_i < -(V_{01} + V_{02})$$

$$V_0 = -V_{01} - V_{02}$$



Recortador tener
a dos niveles

Convertidores de nivel



$$T \gg T(V_L)$$

$$R_L \ll C$$

$$\text{Con } V_{in} = 0 \gg$$

$$V_{in} \rightarrow \text{Don}$$

$$C \text{ carga } (V_{in} - V_o) = V_{in}$$

$$V_{in} = V_o$$

$$V_L \rightarrow \text{Don}$$

$$V_{in} \approx \text{cte} = -2V_p \text{ (Si P-diel)}$$

Ejercicio

Boylestad 2.22

$$V_{in} = 10V$$

$$V_L = -20V$$

$$C = 1 \mu F$$

$$V_{CC} = 5V$$

$$R_L = 100k$$

$$f = 1 kHz \quad T = 1 \text{ ms} \quad T/2 = 500 \mu s$$

$$Z = R_L C = 1 \mu F \cdot 100V = 100 \mu s$$

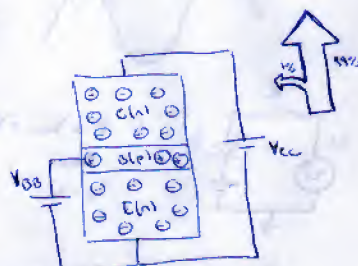
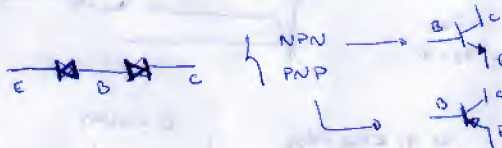
$$V_p \rightarrow V_L (-20V) \rightarrow \text{Don } V_C = -25V \quad V_p = 5V$$

$$V_i \rightarrow V_{in} (10V) \rightarrow \text{Don } V_C = \text{cte} \quad V_o = -V_C \quad V_{in} = 35V$$

Transistor bipolar

Amplificación \rightarrow en región activa

Conmutación \rightarrow se mueve en corte o saturación



Activa (Fuente de corriente controlada por corriente)

$$I_C = I_B + I_E$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_E \approx I_C$$

$$\text{NPN } V_{BE} = V_{BE}$$

$$\text{PNP } -V_{BE} = V_{BE}$$

Corte

$$I_B = 0A \rightarrow \text{BE (PT)} \quad \text{BC (PT)}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 0A$$

PT: polarización inversa
PD: polarización directa

Saturación

$$I_{C \text{ sat}} < I_{C \text{ max}}$$

$$\begin{cases} V_{CE} = 0.2V \\ V_{BE} = 0.8V \end{cases} \text{ (NPN)}$$

$$\text{BE (PD)}$$

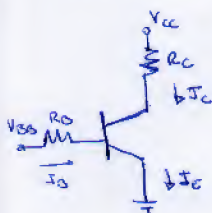
$$\text{BC (PD)}$$

Activa Inversa

BE(PN) BC(PN)

Punto de Trabajo

$$Q = (V_{CE}, I_C)$$



$$V_{BB} = I_B \cdot R_B + V_{BE}$$

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$V_{CC} = 12V, R_C = 1K, (R_B = 1M), V_{BB} = 5V, (\beta = 300)$$

$$V_{BB} = I_B \cdot R_B + V_{BE} \rightarrow 5V = I_B \cdot 1M + 0.7 \rightarrow I_B = 4.3 \mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B \rightarrow I_C = 300 \cdot 4.3 \mu = 1.29 \text{ mA}$$

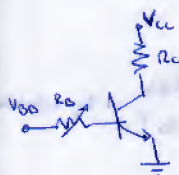
$$(R_B = 100K) \quad I_B = \frac{4.3}{100K} = 43 \mu A \quad I_C = 12.9 \text{ mA} \quad V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 12V - 12.9 \text{ mA} \cdot 1K = -0.9V$$

$$V_{CE} = 0.2V \rightarrow V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C \rightarrow I_C = 11.8 \mu A \quad Q = (0.2V, 11.8 \mu A)$$

$$I_{C \text{ sat}} = \frac{V_{CC} - 0.2}{R_C} = \frac{12 - 0.2}{1K} = 11.8 \mu A$$

$$I_{B \text{ sat}} = \frac{I_{C \text{ sat}}}{\beta} = \frac{11.8 \mu A}{300} = 40 \mu A$$

$$I_B = \frac{5 - 0.7}{100K} = 43 \mu A$$

 $43 \mu A > 40 \mu A$
saturado

$$I_{C1} = \beta I_{B1}$$

$$V_{CE} = I_C \cdot R_C + V_{CE}$$

etc.

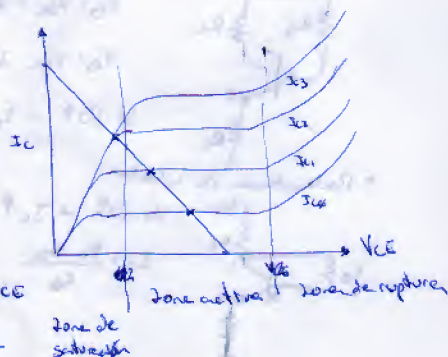
Recta de cargaLa Corte $I_B = 0A, I_C = 0A, V_{CE} = V_{CC}$ La Saturación $V_{CE} = 0.2V, I_C = \frac{V_{CC} - 0.2V}{R_C}$

$$\text{Potencia disipada } (P_D) = I_C \cdot V_{CE}$$

! En el caso de los PNP, las corrientes circulan en sentido contrario y las tensiones son inversas.

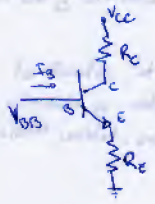
Podemos "darle la vuelta", ordenando el emisor al borde del colector, y viceversa. De esta manera, podemos utilizar tensiones positivas.

No está en activa,
está en saturación



Polarización de transistores

! Polarización de emisor



$$Q(V_{CE}, I_C)$$

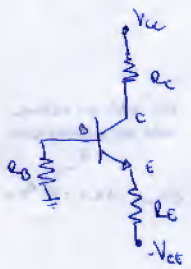
$$V_{BB} = V_{BE} + V_E$$

$$V_E = I_E \cdot R_E$$

$$V_{BB} - V_{BE} = I_E \cdot R_E$$

$$I_E \approx I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E}$$

! Polarización de emisor con dos alimentaciones



$$V_B = V_{BE} + I_E \cdot R_E - V_{EE}$$

$$0 = V_{BE} + I_E \cdot R_E - V_{EE} \quad \left\{ \begin{array}{l} I_C \approx I_E \\ I_B \approx I_E \end{array} \right.$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$$

$$V_{CC} = I_C \cdot R_C + V_{CE} + I_E \cdot R_E - V_{EE}$$

$$V_{CC} = I_C (R_C + R_E) + V_{CE} - V_{EE}$$

$$V_{CC} + V_{EE} - I_C (R_C + R_E) = V_{CE}$$

! Polarización con realimentación negativa

* Realimentación de emisor



$$V_B = V_{BE} + I_E \cdot R_E \rightarrow I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

$$V_B = V_{CC} - I_B \cdot R_B$$

Si $\beta \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow V_B \uparrow \rightarrow I_B \downarrow$ Como $I_B \downarrow \rightarrow I_C$ estable

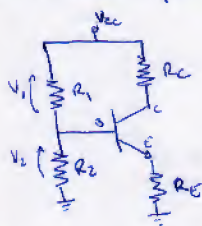
* Realimentación de colector



$$Si \beta \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C \rightarrow V_C \downarrow$$

$$I_B = \frac{V_C - V_{BE}}{R_B} \quad \text{Como } V_C \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \text{ estable}$$

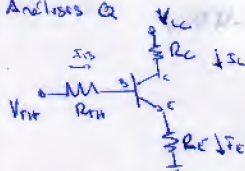
! Polarización por divisor de tensión



Indep. β
Una sola fuente de alimentación

R_1, R_2, R_C, R_E

* Análisis Q



Ej. / Malvino 8.3

$$R_1 = 10k$$

$$R_2 = 2k$$

$$R_C = 8k$$

$$R_E = 1k$$

$$\beta = 200$$

$$V_{CC} = 18V$$

$$R_{TH} = 10k || 2k = 1.6k$$

$$V_{TH} = \frac{10 \cdot 20}{12} = 1.8V$$

$$1.8 = 1.6 I_B + 0.7 + 200 I_B$$

$$I_C = I_E = \beta I_B$$

$$1.0 = 3k I_C + V_{CE} + 1k \cdot I_C$$

* Puntos de diseño

$$V_E = 0.1 V_{CC} \rightarrow R_E$$

$$R_C = 4 R_E$$

$$R_2 \leq 0.1 \cdot \beta \cdot R_E$$

$$R_1 = \frac{V_1}{V_2} R_2$$

Ej. / $V_{CC} = 18V$ $I_C = 10mA$ $\beta \in [100, 300]$

$$V_E = 0.1 V_{CC} = 0.1 \cdot 18V = 1.8V$$

$$R_E = \frac{V_E}{I_E} = \frac{1.8}{10mA} = 180\Omega \quad R_C = 4 \cdot R_E = 720\Omega$$

$$R_2 \leq 0.1 \cdot \beta \cdot R_E \quad R_2 = 0.1 \cdot 100 \cdot 180\Omega = 180\Omega$$

$$R_1 = \frac{8.1}{1.8} 180\Omega = 810\Omega$$

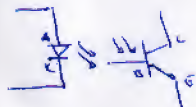
Fototransistor

$$I_D = f(Luz)$$

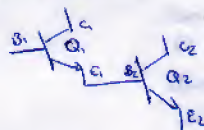
$$I_C = \beta I_B$$



Optoacoplador



Darlington



$$I_{E1} = \beta_1 \cdot I_{B1}$$

$$I_{C1} = I_{B2}$$

$$I_{E2} = \beta_2 \cdot I_{B2}$$

$$= \beta_2 \cdot I_{C1}$$

$$\beta_T = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n = \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot I_{B1}$$

n. número de etapas.

Efecto Early

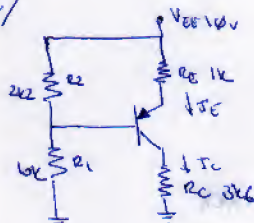
Lo 1 Pagina

Lo 3 de mayo

trabajo voluntario

¡ Me hace gracia q preguntar esto!

Ej. /



$$V_B = \frac{10V}{12.2k} \cdot 10k = 8.2V$$

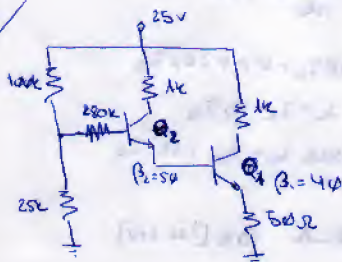
$$V_E = 8.2 - 0.7 = 7.5V$$

$$V_C = \frac{10 - 7.5}{1k} \cdot 3k = 2.5V$$

$$I_E = I_C = \frac{10 - 7.5}{1k} = 2.5mA$$

$$V_{CE} = -4.94V$$

Ej. /



$$V_{B2} = 25 \frac{25k}{125k} = 5V$$

$$5V = 30k \cdot I_{B2} + 0.7V + 0.7V + I_{E1} \cdot 50k$$

$$I_{E1} = 40.5 \cdot I_{B2}$$

$$Q_1 (5.93V, 12.12mA)$$

$$Q_2 (22.23V, 445\mu A)$$

$$100k/25k \parallel 25k$$

$$I_{B2} = 8.9\mu A$$

$$I_{E1} = 18.12mA$$

Transistores de efecto de campo

Bibliografía:

Matte, N.

Leira, A.

JFET (unión)

MOSFET (metal óxido semiconductor)

+ A

superconduct

Bipolar

FET

Activa / Conmutación

Activa / Conmutación (resistencia controlada)

E, B, C

Fuente, Puerta, Drenador

Emisor, Base, Colector

S, G, D

Gran ganancia alta

Gran ganancia discreta

Zancho discreto

Zancho infinito

Sensibles al ruido

Inmunes al ruido

Fuente corriente controlada por tensión

Fuente corriente controlada por tensión

NPN o PNP

Canal N o Canal P

2 tipos de portadores

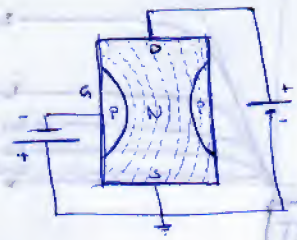
Unipolares

Los FET y todos los componentes son muy sensibles a descargas electrostáticas.

JFET

Siempre de empobrecimiento

! Nos avel de canal N. Canal P lo mismo pero invirtiendo polaridades.



! Como queda lo mismo fabricar uno o dos pueros, normalmente encontramos dos. Aunque es útil en ciertas aplicaciones, como los mezcladores, reactores veremos sólo uno.
! Podemos usar una varianza, flujo $S \rightarrow D$ e incluso aplicar presión lateralmente, G_y .

Estados

ON

Activa (actua)

zona ohmica (resistencia)

Corte

$$V_{GS} = 0V \left\{ \begin{array}{l} I_D \text{ máxima} \\ I_{DSS} \end{array} \right.$$

$$V_{GS} \text{ off } \in V_P \rightarrow V_P = -V_{GS \text{ off}} \left\{ \begin{array}{l} I_D = 0A \end{array} \right.$$

zona
protectora

zona de
resistencia

$$P = I_D \cdot V_{DS} \rightarrow \text{Potencia disipada}$$

$J(V_{DS}, I_D) \rightarrow$ Punto de trabajo



$$\begin{array}{l} I_S = I_D + I_G \\ I_G = 0A \end{array} \left\{ \begin{array}{l} I_S = I_D \end{array} \right. \quad \text{! No es una aproximación, como sucedía en los bipolares.}$$

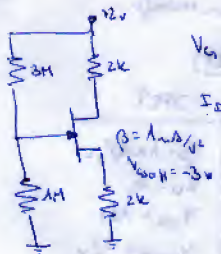
$$V_{GS} \quad V_{GS} \leq V_{GS \text{ off}} \rightarrow \text{Corte} \rightarrow I_D = 0A$$

$$V_{GS} > V_{GS \text{ off}} \rightarrow \text{Activa} \text{ si } V_{GS} \geq -V_{GS \text{ off}} \rightarrow I_D = \beta (V_{GS} - V_{GS \text{ off}})^2$$

$$\text{! zona ohmica si } V_{GS} < -V_{GS \text{ off}} \rightarrow I_D = \beta [2(V_{GS} - V_{GS \text{ off}})V_{GS} - V_{GS \text{ off}}^2]$$

Transconductancia $\mu A/V$

Ej



$$V_{GS} = \frac{12V \cdot 1M\Omega}{4M\Omega} = 3V$$

$$I_D = \beta (V_{GS} - V_{GS \text{ off}})^2$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 3 - 2 \cdot I_D \quad I_D = \beta (3 - 2I_D - V_{GS \text{ off}})^2 = 1(3 - 2I_D + 3)^2$$

$$I_D \left\{ \begin{array}{l} 4\mu A \rightarrow V_{GS} = -5V \text{ No} \\ 2.25mA \rightarrow V_{GS} = -1.5V \text{ Si} \end{array} \right.$$

$$V_{GS} > -V_{GS \text{ off}} \quad V_{GS} = V_G - V_S$$

$$V_D = 12 - 2 \cdot I_D = 12 - 4.5 = 7.5V \quad V_{GS} = 7.5 - 3 = 4.5V \quad 4.5 > 3V \text{ cumple}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 7.5V - 2 \cdot I_D = 7.5 - 4.5 = 3V \quad J(3V, 2.25mA) \rightarrow \text{punto de trabajo}$$

ON y ACTIVA

Curvas de salida del transistor FET

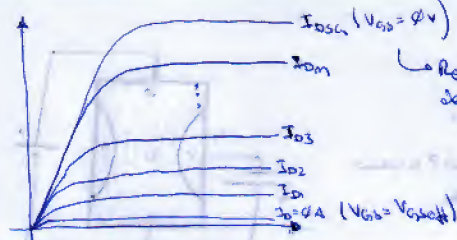
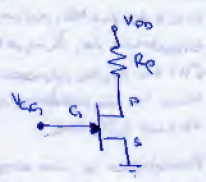
! Fijamos V_{GS}

$$I_D = \beta (V_{GS} - V_{GS \text{ off}})^2$$

! Si variamos V_{DS} n veces I_D es cte. y varía V_{GS}

$$N(I_{D1}, V_{GS1}), (I_{D1}, V_{GS2}), \dots, (I_{D1}, V_{GSn})$$

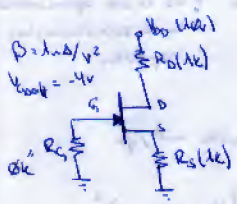
! Si lo repetimos para n valores de V_{GS} , obtenemos n curvas



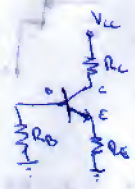
Representa la zona óptica del transistor

Polarización de los FET

- Fuente común
- Modelo de alimentación en fuente
- Modelo de fuentes de alimentación en fuente
- Divisor de tensión
- 7 modelos de alimentación negativa
- E la autopolización



→ Extrapolación a transistor bipolar



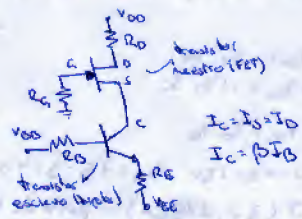
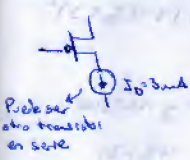
Permanente en corte

$$I_D = \beta (V_{GS} - V_{GS(off)})^2 \quad V_{GS} = 0V \quad V_{DS} = V_{DS} - V_S = -V_S = -I_D \cdot R_E \quad I_D = (-I_D \cdot R_E + 4)^2$$

$$V_{GS} > V_{GS(off)} \quad V_{GS} = V_G - V_S = V_G = V_{DD} - I_D \cdot R_E = 10V - 2.44mA \cdot 1k = 7.56V \rightarrow 7.56 > 4V \text{ ok!}$$

$$V_{DS} = V_G - V_S = 7.56 - 2.44 = 5.12V \quad \text{en } (5.12V, 2.44mA) \rightarrow \text{punto de trabajo}$$

Modelo por polarización por fuente de corriente (generalmente bipolares + JFET)



Q (bipolar)	JFET
$\beta = 120$	$\beta = 1mA/V^2$
$R_D = 10k\Omega$	$R_D = 1k\Omega$
$R_E = 1k\Omega$	$V_{DS} = 10V$
$V_{BE} = -10V$	$V_{GS(off)} = -2V$
$V_{BB} = 5V$	

$$V_{BE} = I_B \cdot R_B + V_{BE} + I_E \cdot R_{EE} + V_{EE} \quad I_E \approx I_B \cdot \beta \quad \text{Sustituimos } I_E \text{ por } \beta I_B \text{ y obtenemos los valores}$$

$$5V = I_B \cdot 10k + 0.7V + I_B \cdot \beta \cdot 1k + (-10V) \quad I_B = 7.1\mu A \quad I_E = 7.1mA \quad \text{Estos valores FET ok, ahora}$$

$$I_D = \beta (V_{GS} - V_{GS(off)})^2 = 7.1mA = (V_{GS} - (-2V))^2 \Rightarrow V_{GS} = 0.665V$$

$$V_{GS} = V_G = V_{DD} - I_D \cdot R_D = 10 - 7.1 = 2.9V > 2 \text{ ok!}$$

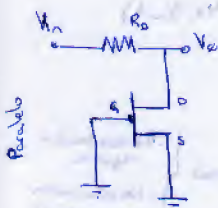
$$V_{DS} = V_G - V_S = 0 - V_S = -V_S = -0.665V \quad V_S = -0.665V$$

$$V_{DS} = V_G - V_S = 2.9 - (-0.665) = 3.565V \quad \text{en } (3.565V, 7.1mA) \quad \text{Q } (2.9V, 7.1mA)$$

El FET como conmutador analógico

FET \equiv Resistencia controlada por tensión

$$R_{DS} = \frac{|V_{GS_{off}}|}{I_{DSS}}$$



$$V_{GS} = V_{GS_{off}} \rightarrow \text{FET corte} \rightarrow R_{DS} = \infty \rightarrow V_O = V_{in}$$

$$V_{GS} = V \rightarrow \text{FET ohmica} \rightarrow R_{DS} = \frac{|V_{GS_{off}}|}{I_{DSS}} \rightarrow V_O = \frac{V_{in} \cdot R_{DS}}{R_D + R_{DS}}$$



$$V_{GS} = 0V \rightarrow R_{DS} = \frac{|V_{GS_{off}}|}{I_{DSS}} \rightarrow V_O \approx V_{in}$$

$$V_{GS} = V_{GS_{off}} \rightarrow R_{DS} = \infty \rightarrow V_O \approx 0V$$

! En ambos casos se debe cumplir $R_D \gg R_{DS}$

MOSFET



Empiezo a conducir (canal ya creado)



Empiezo a conducir (canal sin crear)



Canal N



Canal P

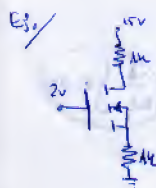
$V_G \rightarrow$ tensión de abastecimiento

$K \rightarrow$ transconductancia

$$\begin{aligned} \text{ON} &\rightarrow V_{GS} > V_T \\ \text{OFF} &\rightarrow V_{GS} \leq V_T \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} V_{GS} &\geq -V_T \rightarrow \text{ACTIVA} \\ V_{GS} &< -V_T \rightarrow \text{OHMICA} \end{aligned} \right.$$

! En ON y ACTIVA $\rightarrow I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$

! En ON y OHMICA $\rightarrow I_D = \frac{K}{2} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$



$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 2 - I_D \cdot 4k$$

$$I_D = (2 - I_D \cdot 4k - 1)^2$$

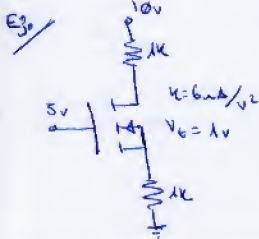
$$I_D \left\{ \begin{aligned} 2.615 \text{ mA} &\rightarrow V_{GS} = -3.3V \\ 0.395 \text{ mA} &\rightarrow V_{GS} = 1.615V \end{aligned} \right.$$

$$V_{GS} > -V_T$$

$$V_D = 16 - 0.395 = 14.615V$$

$$V_{DG} = 12.615V > -1 \text{ ON (ACTIVA)}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 14.615V - 0.395$$



$$I_o = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_t)^2$$

$$V_{GS} = V_t + V_s = 5 - I_o \cdot 1k$$

$$I_o = \frac{3mA}{2} \left(5 - I_o \cdot 1k - 1 \right)^2$$

$$I_o \begin{cases} 5.33 \text{ mA} \rightarrow V_{GS} = -0.33V \\ 3 \text{ mA} \rightarrow V_{GS} = 2V \end{cases}$$

$$V_{DS} = V_t$$

$$V_D = 10 - 3 = 7V$$

$$V_G = 5V$$

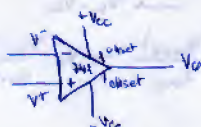
$$V_{DS} = 2V$$

$$2V > -1V \text{ (N/ACTIVA)}$$

$$V_{DS} = V_D - V_S = 7 - 3 = 4V$$

$$M(4V, 3mA)$$

El amplificador operacional

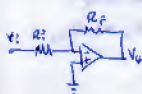


- Impedancia de entrada infinita
- Impedancia de salida nula
- Ganancia en lazo abierto infinita
- Ancho de banda infinito (ideal)

Modo lineal

- Realimentación negativa
- No saturación (max. virtual)

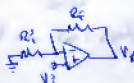
Amplificador inversor



$$\frac{V_o}{R_f} = -\frac{V_i}{R_i}$$

$$V_o = -V_i \left(\frac{R_f}{R_i} \right)$$

Amplificador no inversor



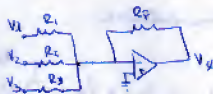
$$\frac{V_o - V_i}{R_f} = \frac{V_i}{R_i}$$

$$V_o = V_i \left(1 + \frac{R_f}{R_i} \right)$$

Seguidor de tensión



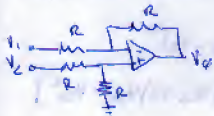
Amplificador sumador inversor



$$\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} = -\frac{V_o}{R_f}$$

$$V_o = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

Amplificador restador



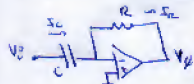
Por superposición:

$$V_{o1} = -V_1 \left(\frac{R}{R} \right)$$

$$V_{o2} = V_2 \left(1 + \frac{R}{R} \right)$$

$$V_o = V_2 - V_1$$

Amplificador derivador

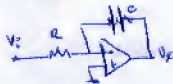


$$V_o = -I_R \cdot R$$

$$I_C = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} C V_i = C \frac{\partial V_i}{\partial t} \quad \left\{ \begin{array}{l} I_R = I_C \\ V_o = -I_R R \end{array} \right.$$

$$V_o = -R C \frac{\partial V_i}{\partial t}$$

Amplificador integrador



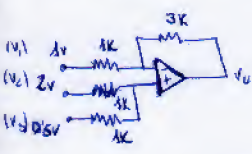
$$V_C = \frac{1}{C} \int i dt$$

$$V_o = -V_C = -\frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{C} \int \frac{V_i}{R} dt = -\frac{1}{RC} \int V_i dt$$

Operaciones superposición

→ Varias fuentes

! Trabajo propuesto por 14 Mayo
Amplificador de instrumentación
Indice expresión V_o
(Bogotá, agosto, tensión)



Teorema de superposición

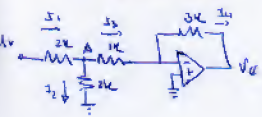
$$V_{o1} = -1V \left(\frac{3k}{1k} \right) = -3V$$

$$V_{o2} = 1V \left(1 + \frac{3k}{1k} \right) = 4V$$

$$V_o = V_{o1} + V_{o2} + V_{o3} = -3V + 4V + 1V = 2V$$

$$V_{o3} = 0.25V \left(1 + \frac{3k}{1k} \right) = 0.75V$$

→ Redes resistivas



Por corrientes

$$I_1 = \frac{1V - V_A}{2k}$$

$$I_2 = \frac{V_A}{2k}$$

$$I_3 = \frac{V_A}{1k}$$

$$I_4 = \frac{-V_o}{3k}$$

$$I_5 = I_4$$

$$I_6 = I_1 - I_2$$

$$\frac{V_A}{1k} = \frac{1V - V_A}{2k} - \frac{V_A}{2k}$$

$$2V_A = 1V - V_A - V_A \quad V_A = \frac{1V}{4} = 0.25V$$

$$I_3 = \frac{0.25V}{1k} = \frac{-V_o}{3k}$$

$$V_o = -0.75V$$

Por Thevenin

$$V_{th} = 0.5V \quad R_{th} = 1k \quad V_o = -0.5V \left(\frac{3k}{2k} \right) = -0.75V$$

Por corrientes

$$I_1 = \frac{V_o - V_A}{R}$$

$$I_2 = \frac{V_A}{R}$$

$$I_3 = \frac{V_A - V_B}{R}$$

$$I_4 = \frac{V_B}{R}$$

$$I_5 = \frac{V_B - V_o}{R}$$

$$I_6 = \frac{V_o}{R}$$

$$I_1 = I_2 + I_3$$

$$I_3 = I_4 + I_5$$

$$I_5 = I_6$$

$$\frac{V_o - V_A}{R} = \frac{V_A}{R} + \frac{V_A - V_B}{R}$$

$$\frac{V_A - V_B}{R} = \frac{V_B}{R} + \frac{V_B - V_o}{R}$$

$$\frac{V_B - V_o}{R} = \frac{V_o}{R}$$

$$\frac{V_B}{2} = V_o \quad V_B = 2V_o$$

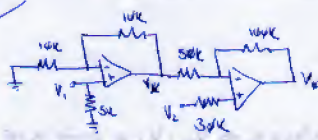
$$\frac{V_A - 2V_o}{R} = \frac{2V_o}{R} + \frac{V_o}{R}$$

$$V_A = 5V_o$$

$$\frac{V_o - 5V_o}{R} = \frac{5V_o}{R} + \frac{5V_o - 2V_o}{R}$$

$$V_o = 13V$$

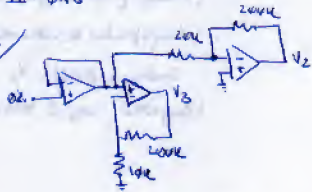
Ej. propuesto



$$V_k = V_1 \left(1 + \frac{100k}{100k} \right) = 2V_1$$

$$V_o = -2V_1 \left(\frac{100k}{30k} \right) + V_2 \left(1 + \frac{100k}{30k} \right) = -4V_1 + 3V_2$$

Ej. /

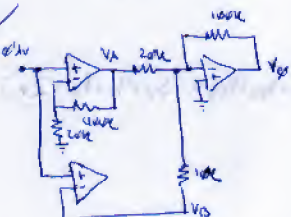


Calcular V_2 y V_3

$$V_2 = -0.2 \cdot \frac{20k}{20k} = -0.2V$$

$$V_3 = 0.2 \left(1 + \frac{20k}{20k} \right) = 0.4V$$

Ej. /



Calcular V_0

$$V_1 = 0.1 \left(1 + \frac{10k}{10k} \right) = 0.2V$$

$$V_0 = -0.2V$$

$$V_0 = -0.2 \left(1 + \frac{10k}{10k} \right) = -0.4V$$

Ej. /



Calcular margen de V_0

$$V_{01} = 0.5 \left(1 + \frac{10k}{10k} \right) = 1.0V$$

$$V_{02} = 0.5 \left(1 + \frac{10k}{10k} \right) = 1.0V$$

$$V_0 = 1.0V - 1.0V = 0V$$

Ej. /

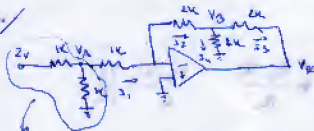


Calcular V_0

$$V_1 = 12V \cdot \frac{10k}{10k} = 12V$$

$$V_0 = -12V \cdot \frac{10k}{10k} = -12V$$

Ej. /



Calcular V_1 , V_0 y V_2

$$I_1 = \frac{2V}{10k} = 0.2mA, I_2 = I_1, V_0 = 0 - I_2 \cdot 2k = -0.4V$$

$$I_4 = \frac{V_0}{2k} = -0.2mA, I_3 = I_2 - I_4 = 0.4mA, V_2 = V_0 - I_3 \cdot 2k = -1.6V$$

$$I_1 = I_2 = 0.2mA, V_0 = -0.4V, I_4 = 0.2mA, I_3 = 2I_2 = 0.4mA$$

Modo no lineal

Amplificador de todo absoluto



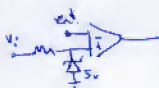
$$V_0 = K \cdot (V_+ - V_-)$$

Señalar en todo absoluto

Trabaja como comparador, solo entre +Vcc y -Vcc

Si $V_+ > V_- \Rightarrow V_0 = K \cdot \alpha$ donde $\alpha > 0 \Rightarrow$ sat. pos.
Si $V_+ < V_- \Rightarrow V_0 = K \cdot \alpha$ donde $\alpha < 0 \Rightarrow$ sat. neg.

Ej. /

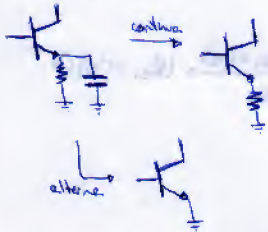


Nota: cualquier magnitud exterior tiene un transistor asociado normalmente.

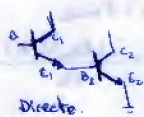
Amplicadores de pequeña señal

En un amplificador, los transistores deben estar en la región activa para que funcionen correctamente.

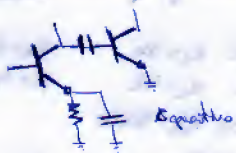
Masa de señal



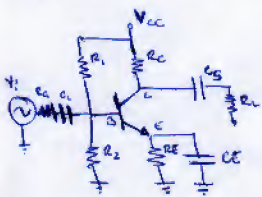
Acoplamiento



Además de los acoplos a verbo, también existe el acoplamiento por transformadores.



Ejemplo bipolar (emisor común)

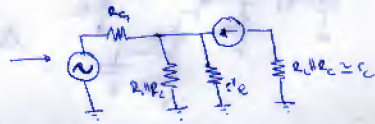


Consideramos que nos encontramos en continua, por lo que sustituimos los condensadores por circuitos abiertos y evaluamos el punto de trabajo. Tiene que estar en activa obligatoriamente.

Consideramos que nos encontramos en alterna, por lo que sustituimos los condensadores por circuitos cerrados.



WFG - β salida
HFE - β entrada



$$A_v = \frac{V_x}{V_b} = \frac{-\beta_c \cdot r_c}{\beta_c \cdot r'_e} = \frac{-r_c}{r'_e}$$

$$R_1 = 15k \quad R_2 = 5k \quad R_C = 3k \quad R_E = 1k \quad R_L = 4k \quad V_{CC} = 20V \quad \beta = 100$$

$$Q(2.8V, 4.3mA)$$

$$r_c = 3k \parallel 4k = 1.71k$$

$$r'_e = \frac{25mV}{I_E} = \frac{25mV}{4.3mA} = 58\Omega$$

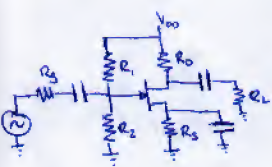
$$A_v = \frac{-1.71k\Omega}{58\Omega} = -294.8$$

$$r'_e = \frac{25mV}{I_E}$$

$$Z_{entrada} = Z_{base} \parallel (R_1 \parallel R_2) = \frac{V_b}{I_b} \parallel (R_1 \parallel R_2) = \frac{\beta \cdot r'_e \cdot \frac{V_b}{I_b}}{\beta} \parallel (R_1 \parallel R_2) = \beta \cdot r'_e \parallel (R_1 \parallel R_2)$$

$$= 100 \cdot 58\Omega \parallel (15k \parallel 5k) = 580 \parallel 3.75k = 507\Omega$$

Ejemplo JFET (fuente común)



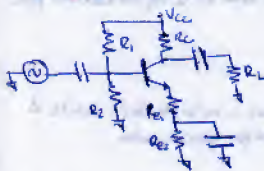
gm: inverso de la resistencia (ms, μs)

$$g_m = \frac{1}{r'_e} \quad JFET \rightarrow g_m = \sqrt{4\beta I_D} \quad MOSFET \rightarrow g_m = \sqrt{2k I_D}$$

$$A_v = \frac{-r_c}{r'_e} = \frac{-r_c}{1/g_m} = -g_m \cdot r_c$$

$$r_c = R_C \parallel R_L$$

$$r_d = R_D \parallel R_L$$

Emisor común con resistencias parcialmente desacopladas

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-i_c \cdot R_c}{i_c (R_{e1} + r_e)} = \frac{-R_c}{R_{e1} + r_e}$$

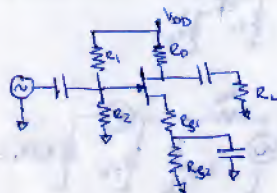
$$Z_e = (R_{e1} \parallel R_{e2}) \parallel Z_{base}$$

$$Z_{base} = \frac{V_b}{i_b} = \frac{i_c (R_{e1} + r_e)}{\beta i_b} = \frac{\beta (R_{e1} + r_e)}{\beta} = (R_{e1} + r_e) \beta$$

Ej. $R_1 = 15k$ $R_2 = 5k$ $V_{cc} = 20V$
 $R_c = 3k$ $R_L = 4k$ $\beta = 100$
 $R_{e1} = 100\Omega$ $R_{e2} = 900\Omega$

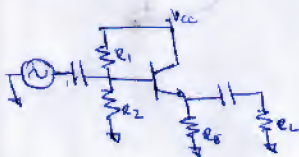
$$A_v = \frac{5k \parallel 4k}{100\Omega + \frac{20V}{4.3mA}} \approx 16.2$$

$$Z_{entrada} = (15k \parallel 5k) \parallel (100 + \frac{20V}{4.3mA}) \cdot 100$$

Fuente común con resistencias parcialmente desacopladas

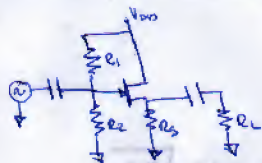
$$A_{v_{mid}} = \frac{-R_d}{r_e + R_{e1}}$$

$$A_{v_{FET}} = \frac{-r_d}{\frac{1}{g_m} + R_{e1}} = \frac{-g_m \cdot r_d}{1 + g_m \cdot R_{e1}}$$

Colector común (seguidor de emisor)

$$A_v = \frac{V_e}{V_b} \leq 1 = \frac{r_e}{r_e + R_e}$$

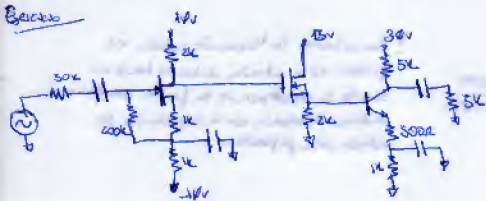
$$Z_{entrada} = (\beta + 1) R_e$$

Drenador común (seguidor de fuente)

$$A_{v_{mid}} = \frac{r_e}{r_e + R_e}$$

$$A_{v_{FET}} = \frac{r_s}{\frac{1}{g_m} + r_s} = \frac{g_m \cdot r_s}{1 + g_m \cdot r_s}$$

Becko



Q? $\beta = 200$

J? $\beta = 1 \text{ mA/V}^2$; $V_{DD} = -6\text{V}$

M? $K = 2 \text{ mA/V}^2$; $V_E = -4\text{V}$

A? Z?

JFET

$$I_D = \beta (V_{GS} - V_{DD})^2$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = -I_D R_S$$

$$I_D = 4 \text{ mA} \quad (V_{GS} = -4\text{V})$$

$V_{GS} > -V_{DD}$

$V_D = 10 - 8 = 2\text{V}$

$V_G = 4 - 4 = -6\text{V}$

$(V_{DS} = 8\text{V}) > 6\text{V}$ active!

$V_{GS} = V_G - V_E = 2 - (-2) = 4\text{V}$

J(4V, 4mA)

MOSFET

$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_E)^2$$

$$V_{GS} = V_G - V_S = 2 - 2I_D$$

$$I_D = 2 \text{ mA}$$

$V_{GS} > -V_E$

$V_D = 15\text{V}$

$V_G = 2\text{V}$

$(V_{DS} = 13\text{V}) > 4\text{V}$ active!

$V_{GS} = V_G - V_S = 15 - 4 = 11\text{V}$

M(11V, 2.5mA)

BJFOLAR

$V_G = V_{GS} + V_E$

$V_{CE} = 30 - 5k \cdot 2.53 \text{ mA} = 17.35\text{V}$

$V_G = V_{GS} = 4.5\text{V}$

$V_E = 0.7 + V_E$

$V_E = 3.8\text{V}$

$I_E R_E = 3.8\text{V} \rightarrow I_E = \frac{3.8\text{V}}{1k5} = 2.53 \text{ mA}$

Q(17.35V, 2.53mA)

$g_{m \text{ JFET}} = \sqrt{4\beta I_D} = 4 \text{ mS}$

$g_{m \text{ MOSFET}} = \sqrt{2KI_D} = 3 \text{ mS}$

$r_e = \frac{25 \text{ mV}}{2.53 \text{ mA}} \approx 10\Omega$

$r_{i \text{ JFET}} = 20k\Omega$

$r_{i \text{ MOSFET}} = \infty$

$r_{i \text{ BJT}} = r_{i \text{ base}} = \beta(k + r_e) = 200 \cdot 500 \approx 100k$

$A_{v1} = \frac{g_{m1} R_D}{1 + g_{m1} R_S} = \frac{4 \text{ mS} \cdot 2k}{1 + 4 \text{ mS} \cdot 1k} = 16$

$$A_{v2} = \frac{g_{m2} R_D}{1 + g_{m2} R_S} = \frac{3 \text{ mS} \cdot 2k}{1 + 3 \text{ mS} \cdot 2k} = \frac{6}{7} = 0.85$$

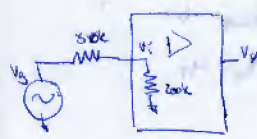
$$R_S = 2k\Omega \parallel 100k \approx 2k$$

$\beta = 200$

$$\Delta v_3 = \frac{-r_c}{r_e + R_{E1} \parallel R_{E2} \parallel 500\Omega} = -4.9$$

$$r_c = R_{C1} \parallel R_{C2} = 5k\Omega \parallel 2k\Omega$$

$A_{v_{total}} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3} = (16) \cdot (0.85) \cdot (-4.9) = 66$



$$V_o = A_v \cdot V_i = A_v \cdot V_g \frac{200k}{200k}$$

! Para calcular la tensión de salida en función de la entrada debemos tener en cuenta la resistencia de la fuente que forma un divisor de tensión con la impedancia de entrada del amplificador.

$$(4-1) \cdot 10^5$$

$$100k \cdot 10^5 = 10^7$$

$$(1-10^5) \cdot 10^5$$

$$100k \cdot 10^5 = 10^7$$

$$(1-10^5) \cdot 10^5$$

$$\frac{200k}{200k} = 1$$

$$V_o = V_g$$

$$V_o = V_g$$

$$V_o = V_g$$

$$V_o = V_g$$

$$V_o = V_g$$

$$V_o = V_g$$

$$V_o = V_g$$